

РАДИОБИОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ АНАТОМИЧЕСКИХ СТРУКТУР ПРИ ОБЛУЧЕНИИ ОПУХОЛЕЙ В ОБЛАСТИ ГОЛОВЫ–ШЕИ

И.Р. Сагов¹, О.М. Стахова², О.А. Миронова¹, В.Д. Черных³, Е.С. Сухих^{4,5}

¹ Национальный медицинский исследовательский центр онкологии им. Н.Н. Блохина Минздрава России, Москва

² Многопрофильный клинический медицинский центр “Медицинский город”, Тюмень

³ Российский университет медицины Минздрава России, Москва

⁴ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск

⁵ НИИ онкологии Томского национального исследовательского медицинского центра РАН, Томск

RADIOBIOLOGIC EVALUATION OF ABSORBED DOSE DUE TO ANATOMICAL CHANGES DURING RADIOTHERAPY OF HEAD AND NECK TUMORS

I.R. Sagov¹, O.M. Stakhova², O.A. Mironova¹, V.D. Chernykh³, E.S. Sukhikh^{4,5}

¹ N.N. Blokhin National Medical Research Center of Oncology, Moscow, Russia

² Multidisciplinary Clinical Medical Centre “Medical City”, Tyumen, Russia

³ Russian University of Medicine, Moscow, Russia

⁴ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

⁵ Oncology Research Institute of Tomsk National Research Medical Center, Tomsk, Russia

Реферат

Цель: Количественная оценка анатомических изменений, вызванных потерей массы тела, на распределение поглощенной дозы у пациентов при облучении области головы и шеи.

Материал и методы: Для исследования отобраны дозиметрические планы 13 пациентов, проходивших лучевую терапию злокачественных новообразований в области головы и шеи. В выборку вошли 3 пациента с опухолями полости рта, 4 пациента с раком гортани и 6 пациентов с опухолями в отделах глотки. Стадии заболевания от T₂N₁ до T₄N₂.

На 3–4 неделе лечения в связи с изменениями массы тела пациентов проводилась повторная или адаптивная КТ-симуляция с использованием того же протокола, что и исходная. Оконтурирование структур на адаптивных КТ изображениях проводил тот же врач, что и на исходных КТ.

Для оценки влияния потери массы тела на распределение поглощенной дозы первичный дозиметрический план переносился на адаптивные (или повторные) КТ (выполненные при снижении массы тела) данные, для чего адаптивные КТ-изображения совмещались с исходными КТ-данными. Регистрация наложения КТ-изображений выполнялась в автоматическом режиме на основе костных структур; начальная точка отсчета (исходные метки КТ) на адаптивных КТ-данных размещалась в том же положении пациента, что и на исходных КТ. Абсолютная погрешность начальной точки отсчета на адаптивных КТ-данных относительно исходных КТ для всех пациентов составила менее 1,4 мм. Первичный дозиметрический план переносился на адаптивные КТ-данные. Все исходные данные первичного дозиметрического плана сохранялись (геометрия пучка, положение изоцентра, количество мониторинговых единиц). Результат распределения поглощенной дозы представлялся как сумма распределения поглощенной дозы в первые 3–4 недели (19–20 фракция) на исходных КТ данных и поглощенной дозы на адаптивных КТ данных после 3–4 недели. Радиобиологическая оценка проводилась на основе модели TCP и NTCP Niemierko.

Результаты: Среднее значение TCP на адаптивных КТ данных составило 86 %, что примерно на 6 % больше запланированного.

Средний объем обеих околоушных желез в начале лечения составил 40,6±15,2 см³. После снижения массы

тела и анатомических изменений на адаптивных КТ-данных среднее значение объема околоушных желез уменьшилось до $30.2 \pm 11.9 \text{ см}^3$, что составляет $25.6 \pm 7.3 \%$ от первоначального объема. Средняя поглощенная доза облучения околоушных желез на адаптивных КТ-данных увеличивается на 4,8 Гр, или на 20,5 %, по сравнению с запланированной. Средний показатель NTCP для околоушных желез, при таких значениях средней поглощенной дозы, составляет $45.5 \pm 23.6 \%$, что на 28,4 % больше от первоначально запланированного.

Заключение: Исследование показало, что потеря массы тела является серьезной проблемой при лучевой терапии опухолей в области головы и шеи. Потеря массы тела приводит к уменьшению объема области головы и шеи, особенно в щечной области, что может значительно увеличить поглощенную дозу в околоушных железах и повысить значения NTCP, однако это также может увеличить поглощенную дозу в саму опухоль и, как следствие, повысить значение TCP.

Тем не менее, существует вероятность существенного уменьшения TCP, ввиду сильного смещения опухоли от центра в одну или другую сторону, что может привести к снижению эффективности лечения. Рекомендуется проводить СВСТ не реже одного-двух раз в неделю для контроля анатомических изменений и обеспечения успешного проведения лечения в соответствии с дозиметрическим планом.

Полученные результаты свидетельствуют о необходимости пересмотра протокола ЛТ в ведении больных с опухолями в области головы и шеи и внедрения стандарта промежуточной КТ переподготовки и перепланирования на 3–4 неделе ЛТ, то есть внедрения адаптивной ЛТ для этой категории пациентов, что позволит контролировать TCP и NTCP и предотвратить нежелательные лучевые осложнения.

Ключевые слова: лучевая терапия, потеря массы тела, адаптивная радиотерапия, вероятность контроля опухоли, вероятность осложнений в нормальных тканях, опухоли головы и шеи

Abstract

Purpose: Quantitative assessment of the impact of anatomical changes due to weight loss on the absorbed dose distribution in patients irradiated to the head and neck region.

Material and methods: For this study, dosimetry plans for 13 patients undergoing irradiation for head and neck cancer were selected. This sample of 13 head and neck cancer patients included 3 cases of oral cavity cancer, 4 cases of laryngeal cancer, and 6 cases of pharyngeal cancer. Disease stages in all patients ranged from T₂N₁ to T₄N₂.

At 3–4 weeks of treatment, a new adaptive CT simulation was performed using the same protocol as the initial CT simulation. Structure delineation on the adaptive CT was performed by the same physician who performed delineation on the initial CT.

To assess the effect of weight loss on absorbed dose distribution, the initial dosimetry plan was transferred to the adaptive CT. To do this: adaptive CT were registered with the initial CT, registration of the adaptive CT was performed automatically based on bone structures, the initial reference point (initial CT markers) on the adaptive CT was placed in the same position as on the initial CT. The absolute error of the initial reference point on the adaptive CT relative to the initial CT for all patients was less than 1.4 mm. The primary dosimetry plans were transferred to the adaptive CT. All original data from the primary dosimetry plans were retained (beam geometry, isocenter position, number of monitor units). The absorbed dose distribution result was obtained as the sum of the absorbed dose distribution in the first 3–4 weeks (19–20 fraction) on the initial CT and the absorbed dose distribution on the adaptive CT after 3–4 weeks.

Radiobiological assessment was performed based on the Niemierko's TCP and NTCP models.

Results: The average TCP value on the adaptive CT was 86 %, which is approximately 6 % higher than planned.

The mean volume of both parotid glands at the beginning of treatment was $40.6 \pm 15.2 \text{ см}^3$. After weight loss and anatomical changes on the adaptive CT, the mean parotid gland volume decreased to $30.2 \pm 11.9 \text{ см}^3$, representing a decrease of $25.6 \pm 7.3 \%$ from the initial volume.

The mean absorbed dose to the parotid glands on the adaptive CT increased by 4.8 Gy, or 20.5 %, compared to the planned dose. The average NTCP for the parotid glands, with these mean absorbed dose values, was $45.5 \pm 23.6 \%$, which is 28.4 % higher than the initial planned.

Conclusion: A study has shown that weight loss is a significant issue during radiation therapy for head and neck cancer. Weight loss leads to a decrease in head and neck volume, particularly in the buccal region, which can significantly increase the absorbed dose to the parotid glands and elevate NTCP values. However, it can also increase the absorbed dose to the tumor itself, resulting in increased TCP values.

Nonetheless, there is a potential for a significant decrease in TCP due to significant tumor displacement to one side or the other, which can reduce treatment efficacy. CBCT is recommended at least once or twice weekly to monitor anatomical changes and ensure successful treatment delivery according to the dosimetry plan.

The most noticeable weight loss occurs at 3–4 weeks of treatment, so it is recommended to discuss adaptive treatment after this period. Adaptive radiation therapy can help control TCP and NTCP and prevent undesirable absorbed dose distribution.

Key words: radiation therapy, weight loss, adaptive radiotherapy, tumor control probability, normal tissue complication probability, head and neck cancer

E-mail: sagov-islam@rambler.ru

<https://doi.org/10.52775/1810-200X-2026-110-2-15-23>

Введение

Злокачественные новообразования головы и шеи занимают седьмое место в мире среди наиболее распространенных видов рака. Международное агентство по изучению рака сообщило о более чем 1 млн новых случаев рака головы и шеи в 2020 г. по всему миру [1]. В России в 2024 г. было зарегистрировано более 40 тыс. новых случаев злокачественных новообразований головы и шеи. Большинство пациентов начинают лечение на III–IV стадии заболевания [2].

В настоящее время лучевая терапия (ЛТ) является одним из ключевых методов лечения рака головы и шеи в мире. Более 70 % пациентов с опухолями в области головы и шеи проходят ЛТ [3]. Дистанционная лучевая терапия (ДЛТ) показала свою эффективность при лечении местнораспространенных форм рака в области головы и шеи. Современные технологии позволили улучшить результаты ЛТ, сделав ее более эффективной для контроля опухоли и более безопасной для нормальных тканей. Ротационное облучение с объемной модуляцией интенсивности пучка излучения (VMAT – volumetric modulated arc therapy) – это высококонформная методика ДЛТ для лечения рака головы и шеи.

Оценка качества дозиметрического плана может быть проведена с помощью радиобиологических критериев. Для радиобиологической оценки дозиметрического плана можно использовать модели вероятности контроля опухоли (TCP – tumor control probability) и вероятности осложнений в нормальных тканях (NTCP – normal tissue complication probability). В то время как TCP должна стремиться к 100 %, что означает полный контроль опухоли, NTCP должна быть как можно ниже и стремиться к 0 %, чтобы исключить осложнения в нормальных тканях.

Одной из критических проблем при лечении рака головы и шеи является потеря массы тела. Исследования показали, что пациенты с высоким индексом массы тела, высокой степенью распространенности опухоли и комплексным лечением (хирургия, лучевая терапия и химиотерапия) подвержены высокому риску значительной потери массы тела вовремя ЛТ [4–6]. В систематических обзорах сообщалось, что потеря массы тела часто составляет от 3,0 до 6,7 кг или 6–12 % при лечении опухолей в области головы и шеи [7–9]. Эта потеря массы тела может значительно изменить анатомическую картину и привести к существенным изменениям в распределении поглощенной дозы

[10–12]. Тем не менее, многие центры лучевой терапии игнорируют проведение промежуточной визуализации с помощью компьютерной томографии с конусным пучком (СВСТ – cone beam computed tomography), полагаясь на фиксацию маски, и продолжают лечение от начала до конца без пересмотра первоначального дозиметрического плана. Адаптивное планирование может повысить эффективность лучевой терапии за счет улучшения локального контроля и снижения нежелательной дозы в нормальных тканях.

Целью данного исследования было изучение влияния анатомических изменений на радиобиологические критерии индивидуального дозиметрического плана.

Материал и методы

Сбор данных

Для исследования отобраны дозиметрические планы 13 пациентов, проходивших ЛТ злокачественных новообразований в области головы и шеи, таким образом, чтобы положение головы и плеч на адаптивных КТ-изображениях (полученных при снижении массы тела) каждого пациента максимально точно совпадало с исходными КТ. Это необходимо для корректной регистрации изображений исходной и адаптивной КТ и, соответственно, для минимизации неопределенности распределения поглощенной дозы в зависимости от положения пациента на лечебном столе. В выборку вошли 3 пациента с опухолями полости рта, 4 пациента раком гортани и 6 пациентов с опухолями отделов глотки. Стадии заболевания от T_2N_1 до T_4N_2 .

Планирование лечения

Всем пациентам проведена топометрическая подготовка при одинаковой фиксации: в положении на спине на опорной пластине с подголовником и индивидуальной термопластической маской. Пациенты находились в максимально воспроизводимом для них положении. КТ проводилась на компьютерном томографе Siemens Somatom Definition AS с толщиной срезов 2 мм. После этого КТ-данные были отправлены в станцию оконтуривания Eclipse (версия 15.6). Врач-радиотерапевт определял органы риска, видимый клинический объем (GTV – gross tumor volume), клинический объем мишени (CTV – clinical target

volume) и планируемый объем мишени (PTV – planning target volume). На КТ-изображениях видимый объем опухоли обозначался как GTV-P, клинический объем опухоли обозначался как CTV-P и был оконтурен как GTV-P + 10 мм на отступ, планируемый объем опухоли обозначался как PTV-70 и имел 3 мм отступ от CTV-P. Также в объем облучения на первом этапе входили лимфатические узлы и обозначались как CTV-N и PTV-50 (CTV-N + 3 мм).

Лечение проводилось в последовательном режиме в два этапа: первый этап – 25 фракций по 2 Гр за фракцию, СД=50 Гр, 5 дней в неделю для PTV-50, и второй этап – последовательная эскалация дозы (boost) для PTV-70: 10 фракций по 2 Гр за фракцию, СД=20 Гр, 5 дней в неделю. После оконтуривания КТ данные отправлялись в систему планирования (СП). Дозиметрическое планирование проводилось с использованием методики VMAT в СП лечения Eclipse для всех пациентов.

Адаптивное лечение

На 3–4 неделе лечения проводилась новая адаптивная КТ-симуляция с использованием того же протокола, что и исходная. Оконтуривание структур на адаптивных КТ-изображениях проводил тот же врач, что и на исходных КТ.

Для оценки влияния потери массы тела на распределение поглощенной дозы первичный дозиметрический план переносился на адаптивные (или повторные) КТ (выполненные при снижении массы тела) данные, для чего: повторные КТ-изображения совмещались с исходными КТ-данными. Регистрация наложения КТ-изображений выполнялась в автоматическом режиме на основе костных структур; начальная точка отсчета (исходные метки КТ) на адаптивных КТ данных размещалась в том же положении пациента, что и на исходных КТ. Абсолютная погрешность начальной точки отсчета на адаптивных КТ данных относительно исходных КТ для всех пациентов составила менее 1,4 мм. Первичный дозиметрический план переносился на адаптивные КТ-данные. Все исходные данные первичного дозиметрического плана сохранялись (геометрия пучка, положение изоцентра, количество мониторинговых единиц). Результат распределения поглощенной дозы представлялся как сумма распределения поглощенной дозы в первые 3–4 недели (19–20 фракция) на исходных КТ-данных и поглощенной дозы на адаптивных КТ-данных после 3–4 недели.

Показатели оценки результатов

Радиобиологическая оценка проводилась на основе модели TCP и NTCP Niemierko [13, 14]. Эта модель основана на EUD (EUD – equivalent uniform dose):

$$EUD = (\sum_i V_i (D_i)^a)^{1/a}, \quad (1)$$

где V_i – доля объема, облученного D_i , a – специфический параметр, который для опухоли отрицательный, а для нормальной ткани положительный. В данном исследовании для опухоли значение a было принято равным –10 [15, 16], а осложнения околоушных слюнных желез лучше всего коррелируют со средней поглощенной дозой ($a=1$) [17–19].

TCP рассчитывается по формуле:

$$TCP = 1 / (1 + (TCD_{50} / EUD)^{4/\gamma_{50}}), \quad (2)$$

где TCD_{50} – доза, необходимая для 50 % контроля опухоли, γ_{50} – нормированный параметр наклона кривой доза–ответ. TCD_{50} и γ_{50} были взяты из работы Maciejewski et al. [20], γ_{50} равно 10,7 Гр, а TCD_{50} взято как среднее значение и равно 70,3 Гр.

NTCP рассчитывается по формуле:

$$NTCP = 1 / (1 + (TD_{50} / EUD)^{4/\gamma_{50}}), \quad (3)$$

где TD_{50} – допустимая доза для 50 % осложнений в нормальных тканях. Параметры TD_{50} и γ_{50} для околоушных желез были взяты из работы Mesbahi A et al. [21] и равны 28,4 Гр и 1 Гр соответственно.

Результаты и обсуждение

Проанализированы распределения поглощенной дозы дозиметрических планов 13 пациентов, проходивших ЛТ злокачественных новообразований в области головы и шеи. Изменения распределения поглощенной дозы в случаях анатомических изменений, вызванных потерей массы тела, становятся очевидными на 3–4 неделе лечения или на 19–20 фракции. На рис. 1 видно, как контуры тела пациента и самих органов меняются из-за потери массы тела. На рис. 2 показано новое распределение поглощенной дозы при снижении массы тела.

Анализ распределения поглощенной дозы на исходных КТ данных

На первом этапе проанализированы первичные дозиметрические планы. Рассчитаны

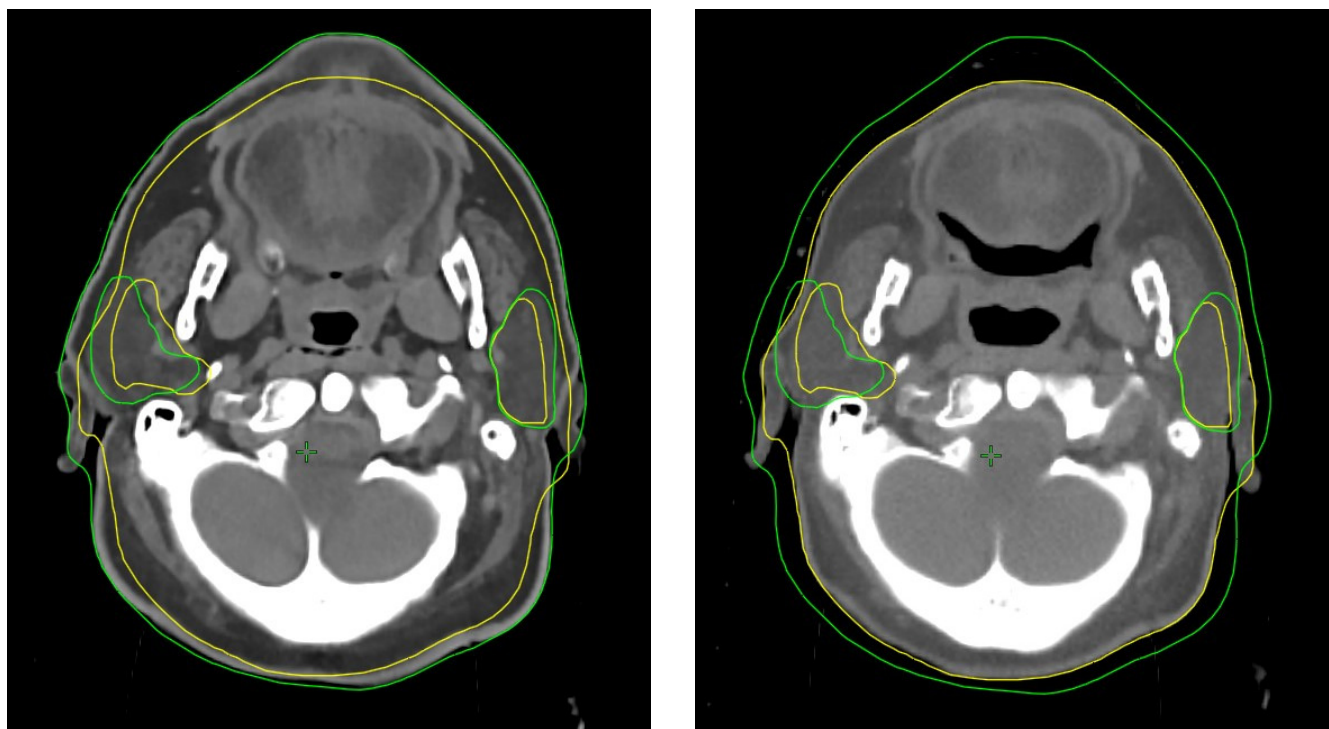


Рис. 1. Пример потери массы тела по данным КТ одного и того же пациента: а) зеленые линии – исходные данные КТ; б) желтые линии – адаптивные данные КТ

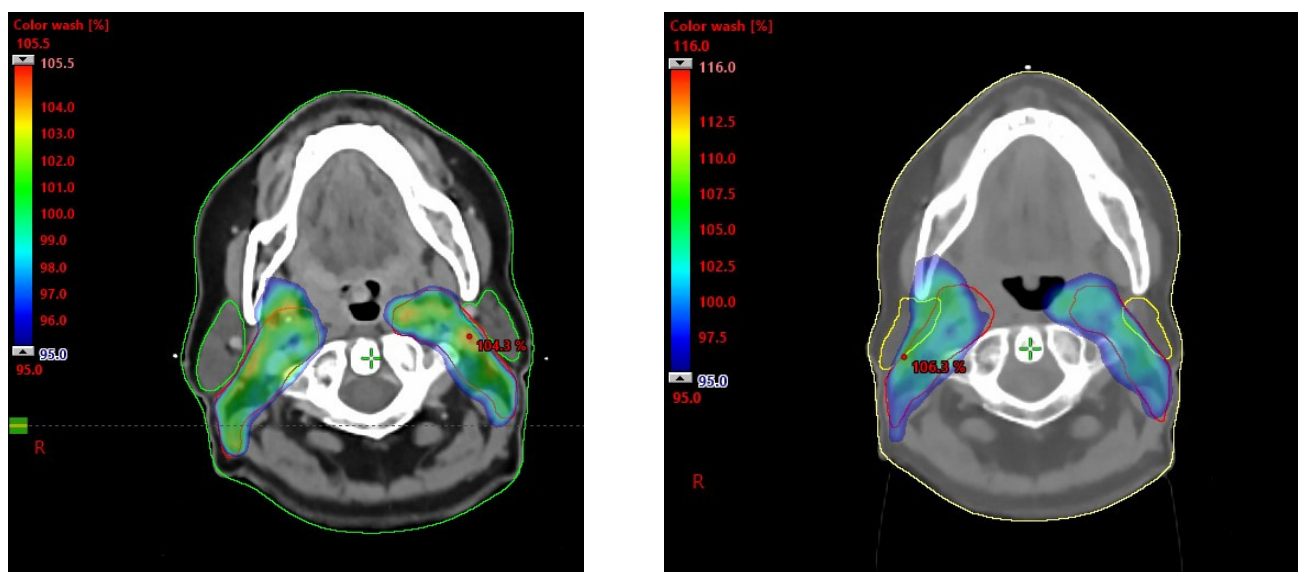


Рис. 2. Пример распределения 95 % поглощенной дозы у одного и того же пациента: а) зеленые линии – первичный дозиметрический план на исходных данных КТ; б) желтые линии – первичный дозиметрический план на адаптивных данных КТ

ТСР для опухоли (PTV-70) и EUD для PTV-50 (EUD-50) и PTV-70 (EUD-70). Также были рассчитаны NTСР и объем обеих околоушных желез.

ЛТ в области головы и шеи часто сопряжена с низким уровнем локального контроля. У пациентов со стадиями T_1 – T_2 после ЛТ локальный контроль может достигать 70–90 % [22,

23], а при стадиях T_2 – T_3 он снижается [24, 25]. В данном исследовании среднее значение ТСР составило $80,8 \pm 7,3$ %, что является неплохим результатом и согласуется с данными других исследований [26, 27].

Для анализа распределения поглощенной дозы учитывался объем обеих околоушных же-

лез. Данный объем сильно варьировал от 26,1 до 84,1, а среднее значение составило $40,6 \pm 10,3 \text{ см}^3$. Средняя поглощенная доза в околоушных железах составила $23,2 \pm 2,1 \text{ Гр}$ и среднее значение NTSP для первичного дозиметрического плана соответственно составило $17,06 \pm 10,0 \%$.

Анализ распределения поглощенной дозы по адаптивным КТ-данным

Распределение первичного дозиметрического плана переносилось на данные адаптивного КТ с сохранением геометрии с целью оценки изменения поглощенной дозы из-за анатомических изменений КТ-данных.

Значения TSP дозиметрических планов на адаптивных КТ-данных, в большинстве случаев показал, что TSP увеличивается с потерей массы тела у пациентов (рис. 3). Среднее значение TSP на адаптивных КТ-данных составило 86 %, что примерно на 6 % больше запланированного. Увеличение значений TSP по данным адаптивных КТ можно объяснить увеличением поглощенной дозы в изоцентре из-за того, что фотоны проходят меньший путь до центра и, следовательно, меньше фотонов поглощаются по пути. Соответственно, так как основная мишень (PTV-70) находится в изоцентре, то она получает более высокую поглощенную дозу, чем ожидалось.

Стоит отметить, что не все дозиметрические планы показали тенденцию к увеличению TSP. Значения TSP уменьшались для пациентов в пяти дозиметрических планах, что может быть обусловлено смещением основной мишени относительно изоцентра. И если три дозиметрических плана показали незначительное уменьшение значения TSP, то случаи 1 и 4 показали совсем плохие результаты TSP. Показатели TSP у этих пациентов значительно отличаются от показателей в общей когорте, хотя значения EUD-50 находятся в среднем диапазоне (среднее значение EUD-50 составляет $50,5 \pm 1,7 \text{ Гр}$ (рис. 4). Это означает, что объем PTV-70 во время последовательного буста получил меньшую дозу, что может быть вызвано сильным смещением опухоли в одну сторону из-за геометрических изменений адаптивных КТ.

Средний объем обеих околоушных желез в начале лечения составил $40,6 \pm 15,2 \text{ см}^3$. После снижения массы тела и анатомических изменений на адаптивных КТ среднее значение объема околоушных желез уменьшилось до $30,2 \pm 11,9 \text{ см}^3$, что составляет $25,6 \pm 7,3 \%$ от

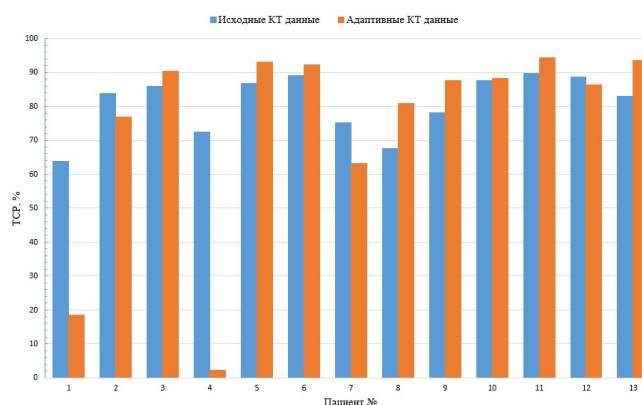


Рис. 3. Сравнительная гистограмма TSP исходной и адаптивной КТ-данных

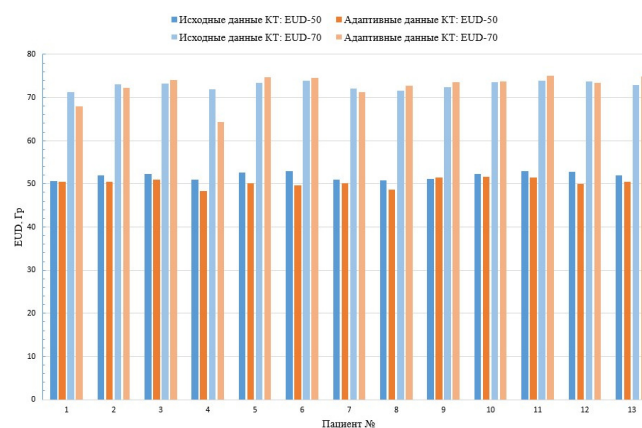


Рис. 4. Гистограмма данных EUD-50 и EUD-70 исходных и адаптивных КТ-данных

первоначального объема. Уменьшение объема околоушных желез наглядно видно на гистограмме (рис. 5), причем уменьшение происходило во всех случаях. Данные значения не противоречат опубликованным данным [28–30]. Такое уменьшение объема околоушных желез приводит к неожиданному распределению поглощенной дозы в околоушных железах.

Поскольку околоушные железы уменьшаются примерно на треть, боковые стороны щечной области также сужаются. Данное уменьшение приводит к увеличению вероятности осложнений в нормальных тканях (рис. 6). Так, в работе O'Daniel et al. [31] авторы сообщили, что доза, доставленная околоушным железам, увеличивается на 5–7 Гр у 45 % пациентов по сравнению с запланированной дозой. Данное исследование показало, что средняя поглощенная доза облучения околоушных желез на адаптивных КТ-данных увеличивается на 4,8 Гр, или на 20,5 %, по сравнению с запланированной. Средний показатель NTSP для околоушных желез при таких значениях средней по-

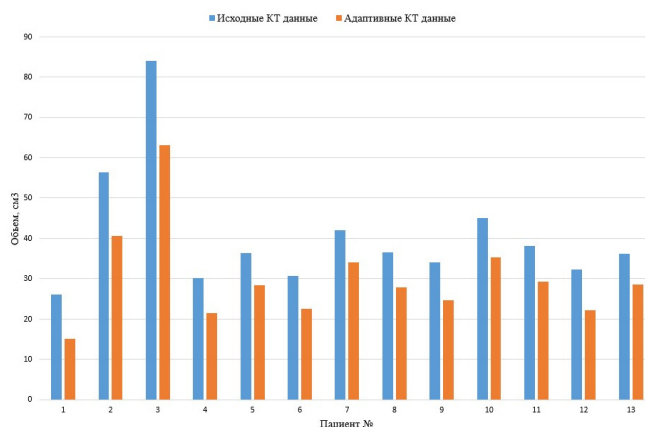


Рис. 5. Гистограмма объёма околоушных желез исходных и адаптивных КТ-данных

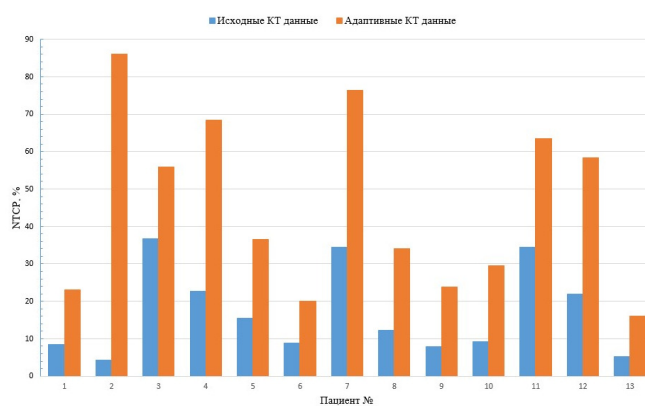


Рис. 6. Сравнительная гистограмма значений NTCP исходных и адаптивных КТ-данных

поглощенной дозы составляет $45,5 \pm 23,6$ %. Таким образом, можно заключить, что анатомические изменения, вызванные потерей массы тела, увеличивают значение NTCP на 28,4 %.

Заключение

Исследование показало, что потеря массы тела является серьезной проблемой при лучевой терапии области головы и шеи. Потеря массы тела приводит к уменьшению объемов в области головы и шеи, особенно в щечной области, что может значительно увеличить поглощенную дозу в околоушных железах и повысить NTCP, однако это также может увеличить поглощенную дозу в опухоли и, как следствие, повысить значение TSP.

Несмотря на то, что снижение массы тела в большинстве случаев повышает показатель TSP, существует вероятность и обратного, когда значение TSP может снизиться, ввиду сильного смещения опухоли от центра в одну или другую

сторону. Это может привести к снижению результатов лечения. Рекомендуется проводить СВСТ не реже одного–двух раз в неделю для контроля анатомических изменений и обеспечения успешного проведения лечения в соответствии с дозиметрическим планом.

Полученные результаты свидетельствуют о необходимости пересмотра протокола ЛТ в ведении больных с опухолями в области головы шеи и внедрения стандарта промежуточной КТ для переподготовки и перепланирования на 3–4-ой неделе ЛТ, то есть внедрения адаптивной ЛТ (современная технология персонализированной ЛТ, основанная на постоянном использовании мультимодальной медицинской визуализации для межфракционной и/или внутрифракционной коррекции плана облучения) для этой категории пациентов, что позволит контролировать TSP и NTSP и предотвратить нежелательные лучевые осложнения.

Список литературы

1. International Association of Cancer Registries. Global Cancer Observatory. Accessed October 28, 2023. <https://gco.iarc.fr/today/home>.
2. Злокачественные новообразования в России в 2024 году (заболеваемость). Под ред. А.Д. Каприна, В.В. Старинского, А.О. Шахзадовой, Н.Ю. Золотарева. М.: МНИОИ им. П.А. Герцена – филиал ФГБУ “НМИЦ радиологии” Минздрава России, 2025. 178 с. Malignant tumors in Russia in 2024 (morbidity). Ed. by A.D. Kaprin, V.V. Starinsky, A.O. Shakhzadova, N.Yu. Zolotarev. Moscow. 2025. 178 p. (In Russ).
3. Delaney G, Jacob S, Barton M. Estimating the optimal radiotherapy utilization for carcinoma of the central nervous system, thyroid carcinoma, and carcinoma of unknown primary origin from evidence based clinical guidelines. Cancer. 2005; 106 (2): 453-65. <https://doi.org/10.1002/cncr.21596>.
4. Lonbro S, Petersen GB, Andersen JR, Johansen J. Prediction of critical weight loss during radiation treatment in head and neck cancer patients is dependent on BMI. Supportive Care in Cancer. 2015; 24 (5): 2101-9. <https://doi.org/10.1007/s00520-015-2999-8>.
5. Nazari V, Pashaki AS, Hasanzadeh E. The reliable predictors of severe weight loss during the radiotherapy of Head and Neck Cancer. Cancer Treatment and Research Communications.

- 2021; 26: 100281. <https://doi.org/10.1016/j.ctarc.2020.100281>.
6. Геворков, АР, Бойко АВ, Болотина ЛВ и Шашкова СВ. Особенности терапии сопровождающего лучевого лечения больных с опухолями головы и шеи. Онкология. Журнал им. П.А. Герцена. 2019; 8 (4): 282-8.
Gevorkov, AR, Boyko AV, Bolotina LV, and Shashkova SV. Features of therapy accompanying radiation treatment of patients with head and neck tumors. Oncology. Herzen State Medical University Journal. 2019; 8 (4): 282-8 (In Russ).
 7. Trotti A, Bellm LA, Epstein JB, et al. Mucositis incidence, severity and associated outcomes in patients with head and neck cancer receiving radiotherapy with or without chemotherapy: a systematic literature review. Radiother Oncol. 2003; 66 (3): 253-62. [https://doi.org/10.1016/s0167-8140\(02\)00404-8](https://doi.org/10.1016/s0167-8140(02)00404-8).
 8. Ottosson S, Zackrisson B, Kjell  n E, Nilsson P, Laurell G. Weight loss in patients with head and neck cancer during and after conventional and accelerated radiotherapy. Acta Oncologica. 2012; 52 (4): 711-8. <https://doi.org/10.3109/0284186X.2012.731524>
 9. Мудунов АМ, Пак МБ и Вольф ЛЯ. Роль нутритивной поддержки в лечении опухолей головы и шеи: клинический случай. Опухоли головы и шеи. 2022; 12 (3): 86-94.
Mudunov AM, Pak MB, and Wolf LA. The role of nutritional support in the treatment of head and neck tumors: a clinical case. Head and Neck Tumors. 2022; 12 (3): 86-94. (In Russ).
 10. Barker JL Jr, Garden AS, Ang KK, et al. Quantification of volumetric and geometric changes occurring during fractionated radiotherapy for head-and-neck cancer using an integrated CT/linear accelerator system. Int J Radiat Oncol Biol Phys. 2004; 59 (4): 960-70. <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2003.12.024>.
 11. Platek ME, Myrick E, McCloskey SA, et al. Pre-treatment weight status and weight loss among head and neck cancer patients receiving definitive concurrent chemoradiation therapy: implications for nutrition integrated treatment pathways. Supportive Care in Cancer. 2013; 21 (10): 2825-33. <https://doi.org/10.1007/s00520-013-1861-0>.
 12. Hansen EK, Bucci MK, Quivey JM, Weinberg V, Xia P. Repeat CT imaging and replanning during the course of IMRT for head-and-neck cancer. Int J Radiat Oncol Biol Phys. 2006; 64 (2): 355-62. <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2005.07.957>.
 13. Niemierko A. Reporting and analyzing dose distributions: A concept of equivalent uniform dose. Med Phys. 1997; 24 (1): 103-10. <https://doi.org/10.1118/1.598063>.
 14. Niemierko A. Radiobiological Models of Tissue Response to Radiation in Treatment Planning Systems. Tumori Journal. 1998; 84(2): 140-143. <https://doi.org/10.1177/030089169808400208>.
 15. Sukhikh ES, Sukhikh LG, Taletsky AV, Vertinsky AV, Izhevsky PV, Sheino IN. Influence of SBRT fractionation on TCP and NTCP estimations for prostate cancer. Physica Medica. 2019; 62: 41-6. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2019.04.017>.
 16. Rana S, Cheng C, Zhao L, et al. Dosimetric and radiobiological impact of intensity modulated proton therapy and RapidArc planning for high risk prostate cancer with seminal vesicles. J Int J Radiat Oncol Biol Phys. 2016; 64 (1): 18-24. <https://doi.org/10.1002/jmrs.175>.
 17. Dijkema T, Raaijmakers CRJ, Ten Haken RK, et al. Parotid Gland Function After Radiotherapy: The Combined Michigan and Utrecht Experience. Int J Radiat Oncol Biol Phys. 2010; 78 (2): 449-53. <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2009.07.1708>.
 18. Roesink JM, Moerland MA, Battermann JJ, Hordijk GJ, Terhaard CHJ. Quantitative dose-volume response analysis of changes in parotid gland function after radiotherapy in the head-and-neck region. Int J Radiat Oncol Biol Phys. 2001; 51 (4): 938-46. [https://doi.org/10.1016/s0360-3016\(01\)01717-5](https://doi.org/10.1016/s0360-3016(01)01717-5).
 19. Eisbruch A, Ten Haken RK, Kim HM, Marsh LH, Ship JA. Dose, volume, and function relationships in parotid salivary glands following conformal and intensity-modulated irradiation of head and neck cancer. Int J Radiat Oncol Biol Phys. 1999; 45 (3): 577-87. [https://doi.org/10.1016/s0360-3016\(99\)00247-3](https://doi.org/10.1016/s0360-3016(99)00247-3).
 20. Maciejewski B, Withers HR, Taylor JMG, Hliniak A. Dose fractionation and regeneration in radiotherapy for cancer of the oral cavity and oropharynx: Tumor dose-response and repopulation. Int J Radiat Oncol Biol Phys. 1989; 16 (3): 831-43. [https://doi.org/10.1016/0360-3016\(89\)90503-8](https://doi.org/10.1016/0360-3016(89)90503-8).
 21. Mesbahi A, Rasouli N. Radiobiological Model-Based Comparison of Three-Dimensional Conformal and Intensity-Modulated Radiation

- Therapy Plans for Nasopharyngeal Carcinoma. Iranian Journal of Medical Physics. 2017; 14: 190-6. <https://doi.org/10.22038/ijmp.2017.22508.1213>
22. Mendenhall WM, Amdur RJ, Morris CG, Hinerman RW. T1-T2N0 Squamous Cell Carcinoma of the Glottic Larynx Treated With Radiation Therapy. J Clin Oncol. 2001; 19 (20): 4029-36. <https://doi.org/10.1200/JCO.2001.19.20.4029>.
23. Fein DA, Mendenhall WM, Parsons JT, Million RR. T1-T2 squamous cell carcinoma of the glottic larynx treated with radiotherapy: A multivariate analysis of variables potentially influencing local control. Int J Radiat Oncol Biol Phys. 1993; 25 (4): 605-11. [https://doi.org/10.1016/0360-3016\(93\)90005-g](https://doi.org/10.1016/0360-3016(93)90005-g).
24. Forastiere AA, Goepfert H, Maor M, et al. Concurrent Chemotherapy and Radiotherapy for Organ Preservation in Advanced Laryngeal Cancer. New Engl J Med. 2003; 349 (22): 2091-8. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa031317>.
25. Induction Chemotherapy plus Radiation Compared with Surgery plus Radiation in Patients with Advanced Laryngeal Cancer. New England Journal of Medicine. 1991; 324 (24): 1685-90. <https://doi.org/10.1056/NEJM199106133242402>.
26. Chatterjee S, Willis N, Locks SM, Mott JH, Kelly CG. Dosimetric and radiobiological comparison of helical tomotherapy, forward-planned intensity-modulated radiotherapy and two-phase conformal plans for radical radiotherapy treatment of head and neck squamous cell carcinomas. Brit J Radiol. 2011; 84 (1008): 1083-90. <https://doi.org/10.1259/bjr/53812025>.
27. Kemp BJ, Thorson RN, Berman DH, et al. NEMA NU 2-2012 performance measurements for the Biograph mCT Flow PET/CT scanner. Med Phys. 2014; 41 (8): 082502.
28. Brouwer CL, Steenbakkers RJ, Langendijk JA, Sijtsma NM. Identifying patients who may benefit from adaptive radiotherapy: Does the literature on anatomic and dosimetric changes in head and neck organs at risk during radiotherapy provide information to help? Radiother Oncol. 2015; 115 (3): 285-94. <https://doi.org/10.1016/j.radonc.2015.05.018>.
29. Hansen EK, Bucci MK, Quivey JM, et al. Repeat CT imaging and replanning during the course of IMRT for head-and-neck cancer. Int J Radiat Oncol Biol Phys. 2006; 64 (2): 355-62. <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2005.07.957>.
30. Wang W, Yang H, Hu W, et al. Clinical study of the necessity of replanning before the 25th fraction during the course of intensity-modulated radiotherapy for patients with nasopharyngeal carcinoma. Int J Radiat Oncol Biol Phys. 2010; 77 (2): 617-21. <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2009.08.024>.
31. O'Daniel JC, Garden AS, Schwartz DL, et al. Parotid gland dose in intensity-modulated radiotherapy for head and neck cancer: is what you plan what you get? Int J Radiat Oncol Biol Phys. 2007; 69 (4): 1290-6. <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2007.08.010>.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.

Поступила: 23.04.2026. **Принята к публикации:** 17.06.2026.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Financing. The study had no sponsorship.

Contribution. Article was prepared with equal participation of the authors.

Article received: 23.04.2026. **Accepted for publication:** 17.06.2026.